

全球域 3 次元移流拡散モデルを用いた 大気中CO₂濃度の研究

田子島一郎* 増田文夫** 武井敦夫** 原 慶太郎*
岡本真一* 田中ちえ*** 白川泰樹***

本研究では、全球域の3次元移流拡散モデルを用い、大気中CO₂濃度の季節変動および経年変動の再現計算を行った。移流拡散モデルには3次元ラグランジアン・ランダムウォーク・モデルを用い、気象場の平均風速及び乱流速度に関する情報は、気象庁全球域気象解析予想モデルの計算結果格子点値を用いた。また、CO₂の放出・吸収源としては陸上の植生および化石燃料の燃焼を考え、陸上植生によるCO₂の吸収と放出量についてはFung *et al.* (1987) により構築されたデータを用い、化石燃料の燃焼に伴うCO₂の大気への放出量についてはMarland *et al.* (1985) の結果を用いた。この結果、季節変動、経年変動について概ね良好な再現結果が得られた。

本学ハイテク・リサーチ・センターでは、初年度より地域環境のシミュレーションの研究を行ってきた。平成10年度より全球域の3次元移流拡散モデルを用いた研究に着手しており、この報告はその成果である。

1. はじめに

人間活動による二酸化炭素 (CO₂) 等の温室効果ガス濃度の急速な増加に伴う地球の温暖化は、近い将来、気候変動や海面上昇等により世界各国の各産業、あるいは生態系に対し様々な影響を及ぼすと考えられ、グローバルな環境問題にとどまらず、経済問題としても現在大きな社会問題となっている。

地球温暖化は非可逆的現象であり、その影響が目に見える形になってから対策に着手したのでは手遅れになる可能性が高い。このため、増加の一途をたどっている大気中のCO₂濃度を安定化させるべく、人間活動によるCO₂排出量の削減に向けた動きが活発になっている。昨年12月に行われた気候変動枠組条約第3回締約国会議 (COP3、京都会議) では、先進国の温室効果ガスの排出削減目標について法的拘束力のある数値目標が決定された。また、植林・森林伐採によるCO₂吸収・放出、共同達成、排出権取引等の仕組みが合意されるなど、今後の地球温暖化防止対策に向けて大きな一歩を踏み出すことになった。

このような行政的な動きがある一方で、地球表層のCO₂循環に関する科学的知見については依然として不明確な点が多く、将来の大気中CO₂濃度の高精度な予測を妨げる要因となっている。このようなCO₂循環の理解をより深めるべく、CO₂の放出・吸収量の推定値あるいは大気拡散モデルを用いた大気中CO₂濃度の計算が数多く行われている。Fung *et al.* (1983, 1987) は、ゴダード宇宙研究所 (GISS) の大気大循環モデル (GCM) を用いて大気中CO₂濃度を計算した。Taylor (1989) は、ラグランジュ型大気輸送モデルを開発し、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の気象データを用いて大気中CO₂濃度を計算した。また、Tans *et al.* (1990) はGISSのGCMにFung *et al.* (1983, 1987) と異なる調節を施し、大気中CO₂濃度分布から放出・吸収量の推定を行った。Taguchi (1996) は、セミラグランジュ法を用いた全球移流拡散モデルにより大気中CO₂濃度の経年変動と季

* 東京情報大学教授

** 東京情報大学助教授

*** 財団法人 日本気象協会

節変動を調べている。

本調査ではこのような観点から、全球3次元移流拡散モデルを用い、大気中CO₂濃度の季節変動および経年変動の再現計算を行った。

2. 全球域3次元移流拡散モデル

2.1 移流拡散モデル

移流拡散モデルには、以下に示した3次元ラグランジアン・ランダムウォーク・モデルを用いた。このモデルは、発生源から追跡粒子を放出し、個々の粒子が平均流と乱流によって運ばれるとして、その後の粒子の分布を、3次元空間で計算するものである。計算領域は全球域とし、座標系はポーラー・ステレオ系を用いた。また、モデル計算では粒子の移流中における地形の効果を考慮に入れ、地形データとしては、全球域の30秒刻みのGTOPO30データを用いた (Gesch and Larson, 1996)。なお、気象場の平均風速及び乱流速度に関する情報は気象庁全球域気象解析予想モデルの計算結果格子点値を用いた。

以下に、本モデルの詳細について述べた。

放出後の粒子の位置は

$$x_i(t) = x_i(t + \Delta t) - U_{pi} \cdot \Delta t \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

但し、

$i = 1$ (x方向)、 2 (y方向)、 3 (z方向)を表す。 Δt は予測計算の時間間隔である。

また、

$$U_{pi} = U_i + u_i$$

ここで、 U_{pi} はx方向、y方向、z方向の風速、 U_i はその気象場の平均風速である。 u_i はx方向、y方向、z方向の乱流速度である。

各方向の乱流速度は、下記の式で求めた。

$$u_i(t + \Delta t) = a \cdot u_i(t) + b \cdot \sigma_{ui} \cdot \xi \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$a = \exp(-\Delta t / \tau_{Lui})$$

$$b = (1 - a^2) / 2$$

ここで τ_{Lui} はラグランジュの時間スケールである。

各方向の乱流速度は、以前の粒子の移動の様子 (移動速度) をひきずる部分 ((2)式右辺の第1項目) とある標準偏差 (値のばらつき) をもって毎回乱数で大きさが任意に変わる部分 ((2)式の第2項目) とで表現される。 ξ は正規乱数であり、 σ_{ui} は風速の標準偏差である。以前の粒子の移動の様子をひきずる部分は、総観規模場の現象で一般的な値となるようなラグランジュの時間スケールを設定した。

風速の標準偏差 σ_{ui} は、拡散係数を与えてテイラーの理論

$$Kx_i = \sigma_{ui}^2 \tau_{Lui} \{1 - \exp(-t / \tau_{Lui})\} \quad (t = 12 \text{時間}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

より逆算する。拡散係数は広域の移流計算に用いられる一般的な値を用いた。

次に、粒子の放出・吸収のプロセスについて述べた。本モデルでは、以下に示したように粒子1個について適当な量のCO₂を与え、各格子の放出・吸収量に応じた数の粒子を放出、吸収させた。

$$n_{ij} = e_{ij} / m \quad (4)$$

n_{ij} : 各格子において放出または吸収される粒子の数

e_{ij} : 各格子のCO₂放出量 (吸収量)

m : 粒子1個あたりのCO₂重量

任意の格子におけるCO₂濃度 C_{ijk} は、上記の移流拡散モデルにより移流・拡散された粒子数等から以下の式により算出した。

$$C_{ijk} = n_p \cdot c_f / v \quad (5)$$

n_p : 任意の格子に含まれる粒子の数

c_f : 換算係数

v : 任意の格子の体積 ($\Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k$)

2.2 気象データ

気象場の平均風速及び乱流速度に関する情報は、気象庁全球域気象解析予想モデルの計算結果格子点値を用いた (Japan Meteorological Agency, 1997)。水平格子幅は、南北方向、東西方向についてそれぞれ2.5°、5.0°である。鉛直格子は等圧面に沿って、地表面に近いところから、1000、850、700、500、400、300、250、200、150、100 (hpa) に区切っている。図1にこのデータの1例を示した。

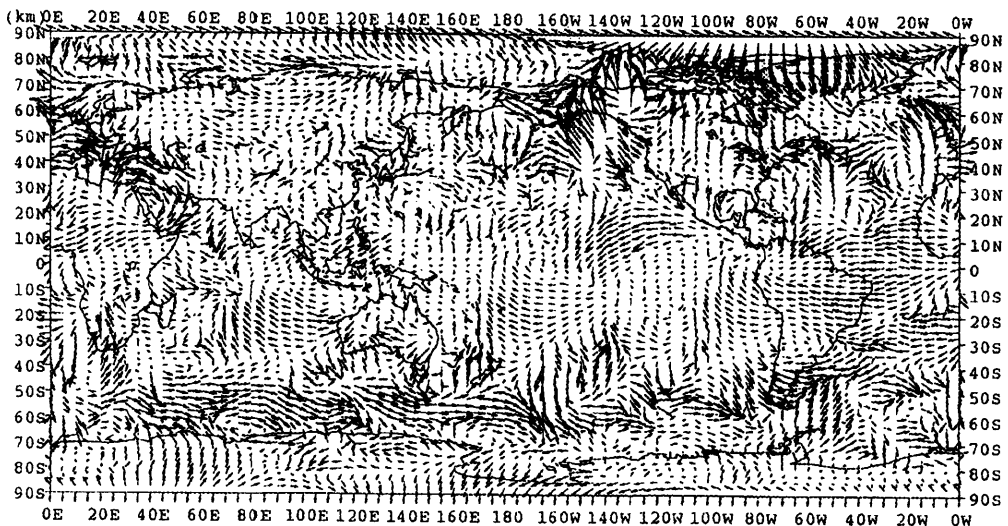


図1 気象庁全球域気象解析予想モデルの計算結果格子点値 (1996.3.2 00UTC 1000hpa)

3. 解析方法

3次元移流拡散モデルを用い、大気中CO₂濃度の季節変動および経年変動の再現計算を行った。

3.1 季節変動の再現

大気中CO₂濃度の季節変動は主に陸上植生によってもたらされる。ここでは、3次元移流拡散

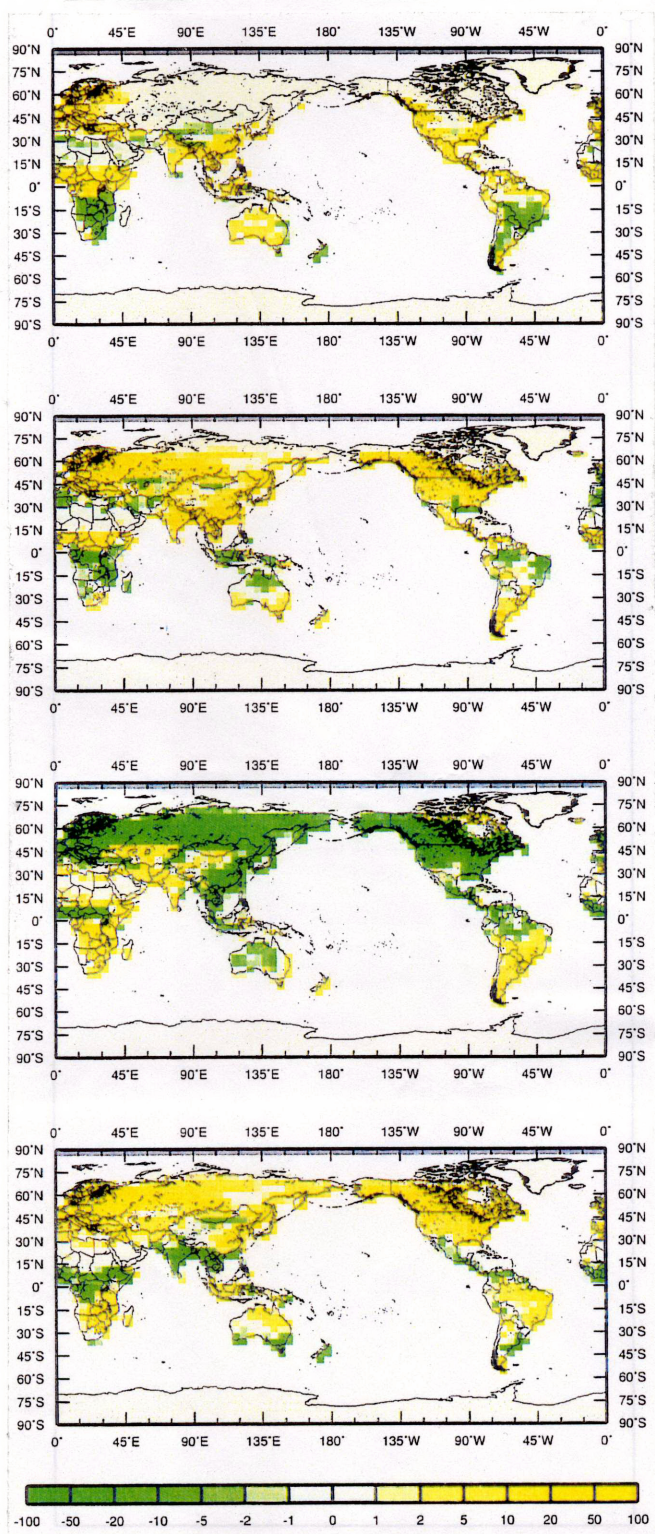


図2 陸上植生によるCO₂放出・吸収量分布図 (単位: $\times 10^6 \text{gC/m}^2/\text{sec}$)
(上から1月、4月、7月、10月の分布)

モデルと陸上植生の放出・吸収データを用い、大気中CO₂濃度の季節変動を計算した。なお、陸上の植生によるCO₂の吸収と放出量については、Fung *et al.* (1987) により構築されたデータを用いた (図2参照)。このデータでは、陸上植生による吸収は人工衛星観測から求めた正規化差分植生指数によって、また放出は土壌の呼吸による有機物の分解を土地被覆による分類、気温、降水量の関数として計算されている。

3.2 経年変動の再現

化石燃料の燃焼による大気中CO₂濃度の増加を、3次元移流拡散モデルと発生源データにより計算した。なお、化石燃料の燃焼に伴うCO₂の大気への放出量についてはMarland *et al.* (1985) の結果を用いた (図3参照)。このデータは、国別の排出量を人口の分布から1度×1度に配分したものである。

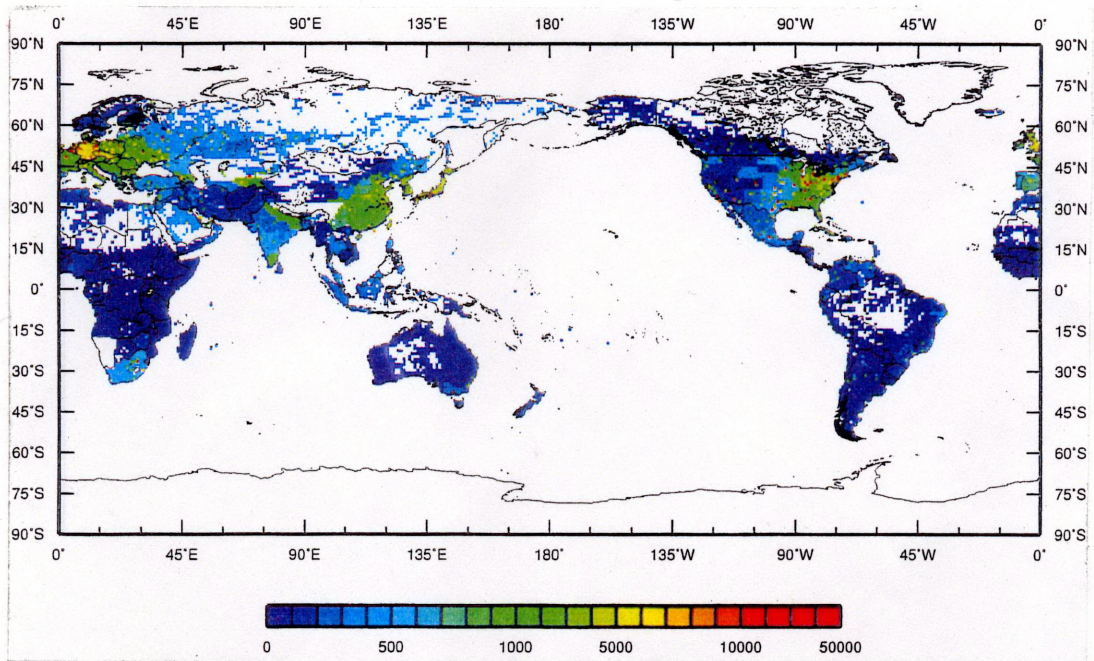


図3 化石燃料の燃焼によるCO₂放出量分布図 (単位: $\times 10^6 \text{ kgC/m}^2/\text{year}$)

3.3 計算条件

季節変動の再現計算では、初期値として全格子に350ppmの濃度を与え計算を行った。なお、境界値は与えていない。経年変動の再現計算では濃度の上昇傾向のみを評価するため、初期値、境界値とも与えておらず、吸収過程も考慮していない。また、計算時間間隔 Δt は5日とし、1年間の積分を行った。

3.4 CO₂観測データ

計算値と観測値との検証にあたっては米国大気海洋庁・気候監視診断室 (CMDL/NOAA) により提供されているCO₂観測データの月平均データを用いた (Conway *et al.*, 1994)。検証に用い

た観測地点を図4に示した。また、参考までに各地点における1987年～1996年の濃度変動を図5に示した。

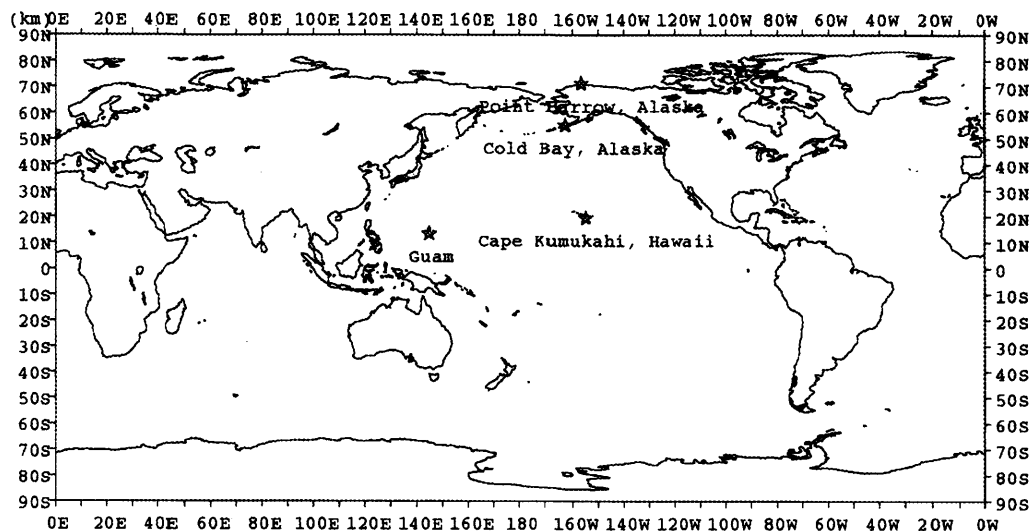


図4 モデルの検証に用いた観測地点

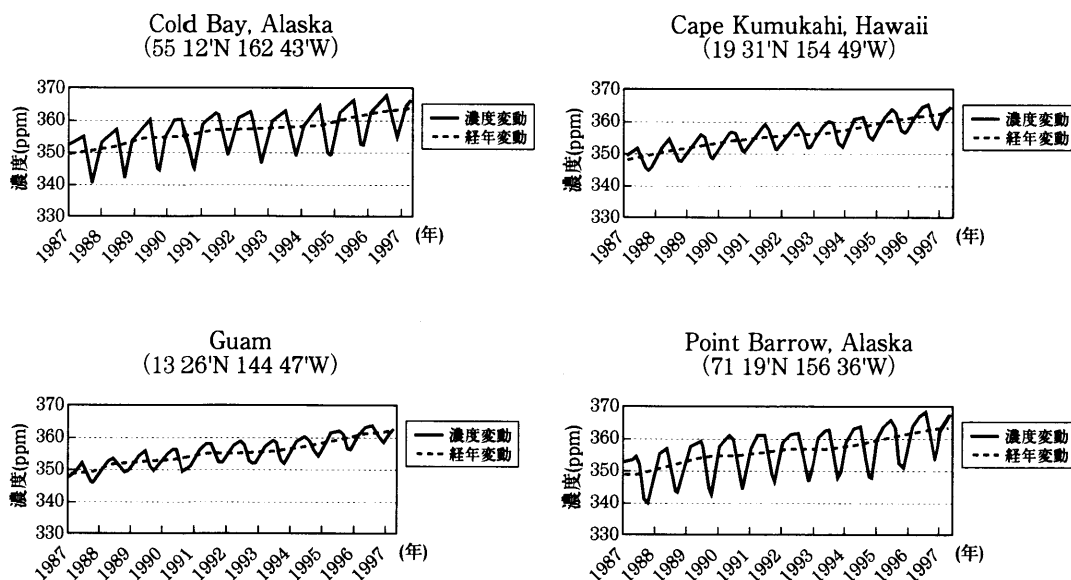


図5 各観測地点におけるCO₂濃度変動

4. 結果と考察

4.1 計算結果

全球域3次元移流拡散モデルによる大気中CO₂濃度の地上付近（1000hpa）の計算結果を図6に示した。なお、この結果は12月の月平均場である。

4.2 考察

4.2-1 季節変動

全球域3次元移流拡散モデルによる大気中CO₂濃度の季節変動の計算値と観測値の比較結果を図7に示した。この図には、計算あるいは観測されたCO₂濃度の変動から季節変動成分のみを抽出した結果を示した。なお、図7の各図の計算値は月平均値であり、各タイムステップの濃度を1か月にわたり加算し、タイムステップ数で除した値である。また、計算値は図4に示したそれぞれの観測点を含む格子の中心の値である。

これらの結果から、Cold Bayでは、計算された夏期の濃度低下が過大であるが、季節変動の位相については概ね良好な再現性が得られている。Cape Kumukahiでは、8月から12月の再現性については良好であるが、その他の期間の整合性は良くなく、計算値の極大値、極小値が観測値に比べ数ヶ月早く出現している。また、極大値は観測値に比べ過大であり、極小値は過小である。Guam、Point Barrowの計算結果においてもCape Kumukahiと同様の位相のずれが見られる。また、Point Barrowでは季節変動の振幅が観測値に比べ非常に大きい結果となっている。

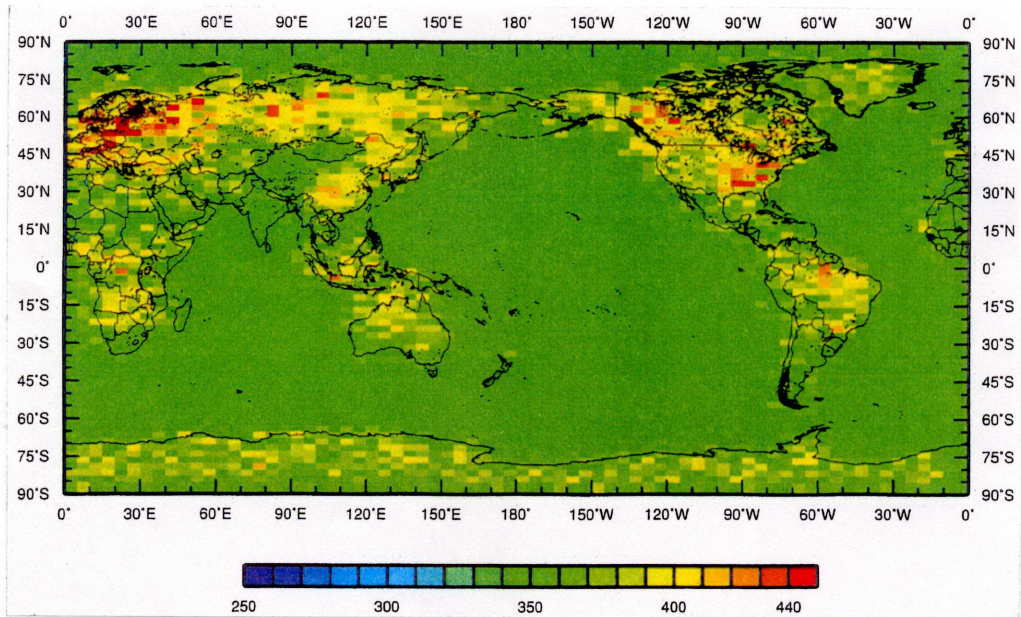


図6 全球域3次元移流拡散モデルによる大気中CO₂濃度分布図

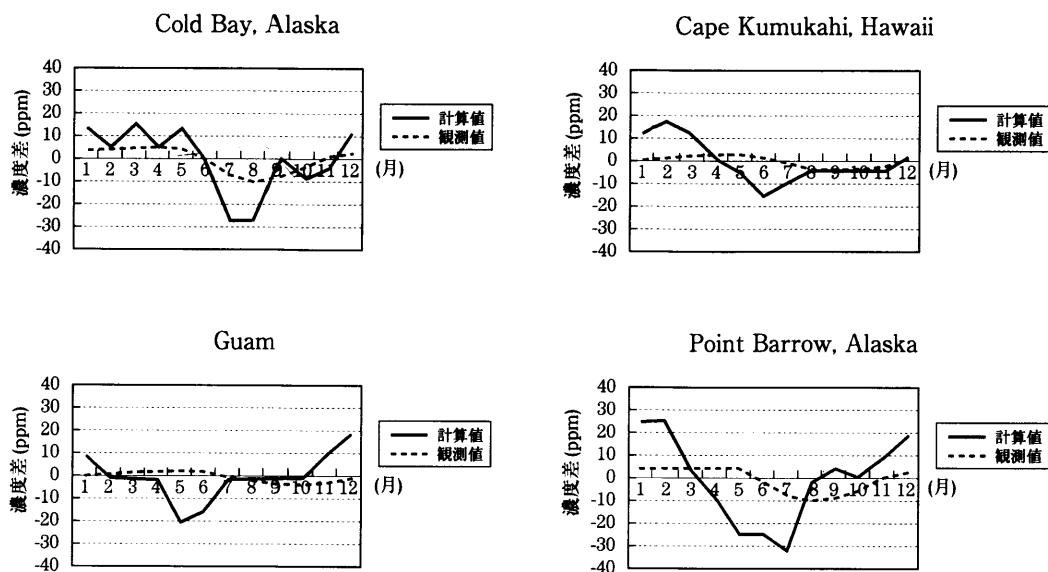


図7 計算値と観測値の比較 (季節変動成分)

4.2-2 経年変動

大気中CO₂濃度の経年変動の計算値と観測値の比較結果を図8に示した。図8には、計算あるいは観測されたCO₂濃度の変動から経年変動の成分のみを抽出した結果を示した。なお、図中の計算値と観測値は図7と同様に月平均値である。

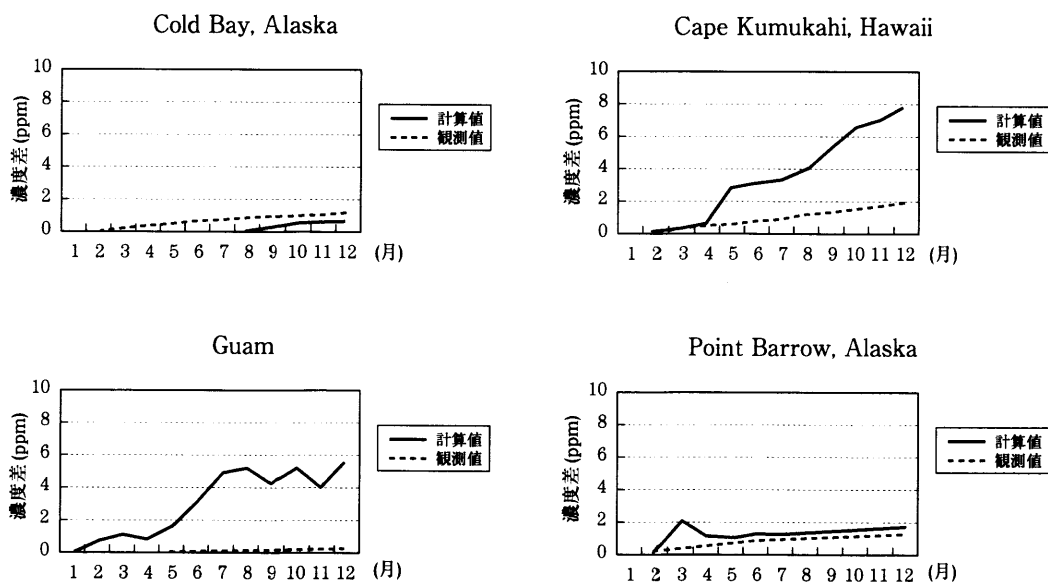


図8 計算値と観測値の比較 (経年変動成分)

これらの結果から、計算値と観測値のCO₂濃度の上昇はPoint Barrowで良好な再現性を示している。Cold Bayでは7月までは再現性は良くないが、8月以降の増加率の再現性については概ね良好である。Cape Kumukahiでは、4月までは良好な再現性が得られているものの、5月以降については計算結果が最大で6ppm程過大となっている。また、Guamにおいても計算結果が過大である。

4.3 まとめ

本研究では、全球域3次元移流拡散モデルによる大気中CO₂の季節変動、経年変動の再現計算を行った。この結果、季節変動、経年変動について概ね良好な再現結果が得られたが、今後、鉛直濃度分布の検証等も含め、検証を重点的に行っていく必要がある。

なお、この報告は本学のハイテク・リサーチ・センターでの研究の一部である。

引用文献

- Conway, T.J., Pieter P. Tans, Lee S. Waterman, and Kirk W. Thoning, Duane R. Kitzis, Kenneth A. Masarie, and Ni Zhang, 1994 : Evidence for international variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network., *Journal of geophysical research* Vol.99. No.D11, pp.22,831-22,855.
- Fung, I. Y., K. Prentice, E. Matthews, J. Lerner and G. Russel, 1983 : Three-Dimensional tracer model study of atmospheric CO₂ : Response to seasonal exchanges with the terrestrial biosphere, *Journal of geophysical research* Vol.88. No.C2, pp.1,281-1,294.
- Fung, I. Y., C.J. Tucker, K.C. Prentice, 1987 : Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere - biosphere exchange of CO₂, *Journal of geophysical research* Vol.92. No.D3, pp.2,999-3,015.
- Gesch, D.B., and Larson, K.S., 1996 : Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. In: Pecora Thirteen, Human Interactions with the Environment - Perspectives from Space, Sioux Falls, South Dakota, August 20-22, 1996.
- Japan Meteorological Agency, Numerical Prediction Division, 1997 : Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.
- Marland, G., R. M. Rotty and N.L.Treat, 1985 : CO₂ from fossil fuel burning:global distribution of emissions, *Tellus* 37B, pp.243-258.
- Taguchi, S. 1996 : A Three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds : Model description and simulation results for TRANSCOM, *Journal of geophysical research* Vol.101. No.D10, pp.15,099-15,109.
- Tans, P. P., I. Y. Fung, T. Takahashi, 1990 : Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget, *Science* Vol.247, pp.1,431-1,438.
- Taylor, J. A., 1989 : A stochastic Lagrangian atmospheric transport model to determine global CO₂ sources and sinks - a preliminary discussion, *Tellus*, 41B, pp.272 - 285.